

基于数值分析的预估基坑开挖对环境影响的简化方法

王浩然, 王卫东, 徐中华

(华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002)

摘要: 上海市《基坑工程技术规范》根据上海地区大量工程实测数据给出了预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法, 但是该方法不能综合考虑影响基坑变形的主要因素。本文通过对有限元计算结果的分析及拟合, 推导了能综合考虑基坑系统刚度、挖深和宽度因素的板式支护体系基坑地表最大沉降的简化计算公式, 并给出了地表沉降预测曲线。采用给出的简化方法预测了若干板式支护体系基坑墙后地表沉降并与实测结果进行了对比, 验证了方法的适用性。最后采用地表沉降预测曲线作为预估上海地区板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化方法, 计算实例表明该简化方法能较好地预估上海地区基坑开挖对周边环境的影响。

关键词: 板式支护体系基坑; 环境影响; 简化方法; HS-Small 模型; 有限元法

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0108-05

作者简介: 王浩然(1982-), 男, 江苏无锡人, 博士, 工程师, 从事深基坑工程的设计与理论分析。E-mail: whr1127@sohu.com。

Simplified method for evaluating excavation-induced impact on surrounding environment based on numerical analysis

WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua

(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architectural Design & Research Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: A simplified analysis method is proposed by Shanghai Technical Code for Excavation Engineering to evaluate excavation-induced damage of buildings. However, this method can not consider the main factors which affect the deformation of excavations. The simplified calculation formula considering system stiffness, excavation depth, excavation width for the maximum ground surface settlement is deduced by normalizing FEM results. The ground surface settlement profile behind the embedded walls is also provided. The validity of the simplified method of ground surface settlement prediction for excavations retained by embedded walls is verified by calculating several case histories in Shanghai. The ground surface settlement profile is used as the simplified analysis method to evaluate excavation-induced impact on surrounding environment. An example shows that this simplified method is suitable for analyzing excavation-induced impact on surrounding environment.

Key words: embedded wall-retained excavation; excavation-induced impact; simplified method; HS-Small model; FEM

0 引 言

上海地区建筑物密集、管线繁多、地铁车站密布、地铁区间隧道纵横交错, 在这种复杂城市环境条件下的深基坑工程, 除了需关注基坑本身的安全以外, 尚需重点关注基坑开挖对周边环境的影响。根据上海市《基坑工程技术规范》^[1], 地下连续墙、钻孔灌注桩、钢板桩和型钢水泥土搅拌墙等统称为板式支护体系围护墙。目前板式支护体系基坑开挖对周边环境的影响的分析方法主要有两种, 即连续介质有限元方法和简化方法^[2]。有限元方法需要考虑基坑与周围建筑物的相互作用, 分析时涉及到土体本构模型的选择、参数的确定、周边建筑物的存在对土体应力场影响的模拟

等, 且周边建筑物本身如何模拟及其参数确定也存在较大难度, 因此要获得较好的结果难度很大。简化方法简单明了, 易于为工程师掌握, 且简化方法分析得出的结果与有限元方法得出的结果可进行相互验证以更加合理地分析基坑开挖对周边环境的影响。文献[2]根据上海地区大量工程实测数据提出了预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法, 该法已被上海市《基坑工程技术规范》^[1]所采用, 但该法不能综合考虑基坑开挖深度、系统刚度、基坑宽度等影响基坑

基金项目: 上海市青年科技启明星计划 B 资助项目 (11QB1400400)

收稿日期: 2012-08-25

变形的主要因素。

本文针对文献[3]分类的上海地区板式支护体系基坑, 结合上海典型土层 HS-Small 模型参数, 建立不同的有限元模型进行分析。通过对有限元计算结果的分析及拟合, 推导了能够综合考虑基坑系统刚度、基坑挖深和宽度因素的上海地区板式支护体系基坑地表最大沉降的简化计算公式, 并给出了地表沉降预测曲线。采用本文提出的简化方法预测了上海地区 5 个板式支护体系基坑墙后地表沉降并与实测结果进行了对比, 用以验证方法的适用性。最后采用地表沉降预测曲线作为预估上海地区板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化方法, 并用具体工程实例给出了利用简化方法预估基坑开挖对邻近浅基础建筑物的影响。

1 有限元模型

1.1 几何模型

根据文献[3]的研究, 上海地区常见的板式支护体系基坑可分为如下 4 类: A 类, 基坑挖深一般小于 7 m, 坑内采用 1 道支撑支护, 围护结构插入比范围约为 1.2~1.9; B 类, 基坑挖深一般为 7~12 m, 坑内采用 2 道支撑支护, 围护结构插入比范围约为 1.0~1.5; C 类, 基坑挖深一般为 12~17 m, 坑内采用 3 道支撑支护, 围护结构插入比范围约为 0.9~1.1; D 类, 基坑挖深一般为 17~23 m, 坑内采用 4 道支撑支护, 围护结构插入比范围约为 0.7~0.9。

针对以上分类, 本文建立 A、B、C、D4 个基本有限元分析模型, 分别对应于上述 4 类典型的板式支护体系基坑。基本模型中均假定基坑的平面形状为 120 m×80 m 的矩形, 选取中间剖面作为平面应变分析对象, 考虑对称性取 1/2 模型。

模型 A 基坑挖深为 6 m, 墙体深度为 15 m, 插入比为 1.5; 模型 B 基坑挖深为 11 m, 墙体深度为 24 m, 插入比为 1.2; 模型 C 基坑挖深为 16 m, 墙体深度为 32 m, 插入比为 1.0; 模型 D 基坑挖深为 21 m, 墙体深度为 42 m, 插入比为 1.0。所有基本模型的首道支撑均位于地表以下 1 m 处, 支撑竖向间距均为 5 m。地下水位设在地表以下 1 m 处。

1.2 结构参数

对于 A 类基坑, 由于其挖深较浅, 实际工程中一般用直径 700~800 mm 的灌注桩进行围护, 为了便于建模, 此处采用 800 mm 的灌注桩, 并将其等效成每延米相同抗弯刚度的 600 mm 厚地下连续墙; 对于 B 类、C 类和 D 类基坑, 围护结构分别采用 800 mm、800 mm 和 1000 mm 厚地下连续墙。模型中支撑均采用钢筋混凝土支撑, 所采用的支护形式均是对应于上

海典型开挖深度的典型支护形式。结构输入参数如表 1。

表 1 基本分析模型的结构参数

Table 1 Parameters of structures of FEM model

基本模型	围护结构			支撑系统	
	厚度/mm	EI /($MN \cdot m^2 \cdot m^{-1}$)	EA /($MN \cdot m^{-1}$)	截面/mm	EA /($MN \cdot m^{-1}$)
A	600	540	18000	800×700	1867
B	800	1280	24000	900×800	2400
C	800	1280	24000	1000×800	2667
D	1000	2500	30000	1000×800	2667

1.3 土体 HS-Small 模型参数

土体的本构模型采用 HS-Small 模型, 该模型是由 Benz^[4]在 HS 模型的基础上修正而来。修正后的 HS 模型不仅继承了 HS 模型可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化的特点而且可以考虑剪切模量在微小应变范围内随应变衰减的行为。HS 模型适合于敏感环境下的基坑开挖数值分析^[5], HS-Small 模型较 HS 模型具有更好的适用性, 计算结果能给出更为合理的墙体变形及墙后土体变形^[6]。文献[3]给出了上海典型土层的 HS-Small 模型参数和各典型土层的厚度。

为了便于论述, 定义基坑几何变量和变形变量如下(图 1): H_e 为基坑挖深; h_i 为支撑竖向间距; h 为支撑平均竖向间距; H_w 为围护结构深度; h_u 为悬臂挖深; T 为围护结构插入深度; s 为支撑水平间距; ρ 为基坑系统刚度; δ_{hmax} 为围护结构最大侧移; δ_{vmax} 为地表最大沉降。此外定义 B 为基坑宽度; L 为基坑长度。

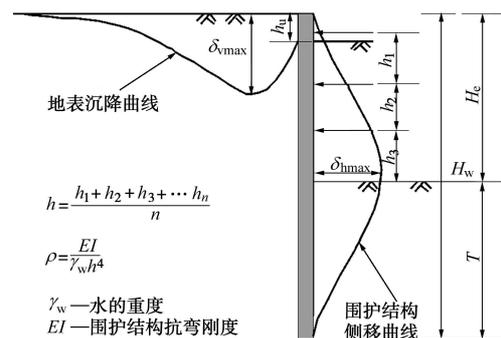


图 1 板式支护体系基坑几何变量及变形变量的定义

Fig. 1 Definition of parameters to describe deformation and geometry of excavations retained by embedded walls

2 墙后地表最大沉降计算结果分析

2.1 地表最大沉降计算公式

图 2 是不同宽度下地表最大沉降与开挖深度比值与系统刚度的关系。每一基坑宽度和每一开挖深度下, 地表最大沉降与开挖深度的比值与系统刚度的关系曲

线, 均可由式 (1) 拟合, 并且该式具有足够的精度。

$$100 \frac{\delta_{vmax}}{H_e} = c \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4} \right)^d, \quad (1)$$

式中, c, d 为待定系数, 具体的 c, d 值见表 2。

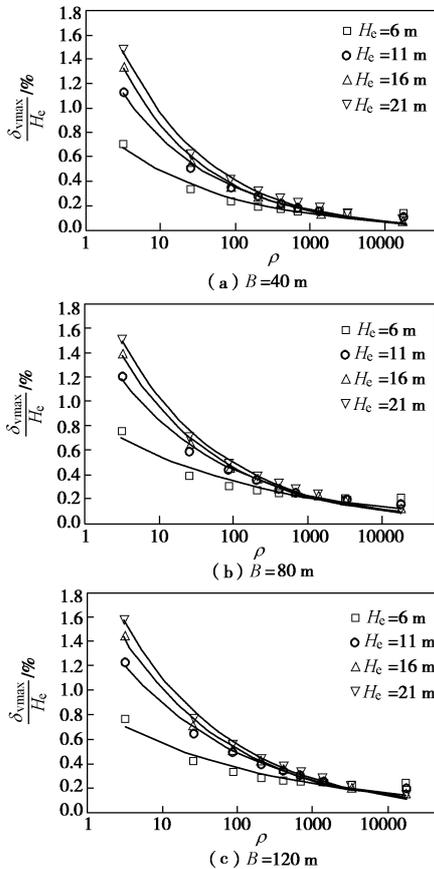


图 2 地表最大沉降与开挖深度比值与系统刚度的关系

Fig. 2 Relationship between normalized maximum ground surface settlement and ρ

表 2 (δ_{vmax}/H_e) 与 ρ 关系曲线拟合结果

Table 2 Fitting results of relationship between ρ and δ_{vmax}/H_e

B /m	H _e /m	表达式系数		判定函数 R ²
		c	d	
40	6	0.937	-0.282	0.99
	11	1.659	-0.338	
	16	2.053	-0.376	
80	6	0.886	-0.205	0.99
	11	1.627	-0.284	
	16	1.981	-0.317	
120	6	0.881	-0.188	0.99
	11	1.621	-0.258	
	16	1.988	-0.291	

从表 2 可以看出, 每一 B 值下, c 随着 H_e 的增大而增大, d 随着 H_e 的增大而减小。 c 与 H_e 的关系可由式 (2) 近似表达, 如图 3 所示。 d 与 H_e 的关系可近

似表达为式 (3), 如图 4 所示。式 (2) 和式 (3) 的判定函数 R^2 均为 0.97, 因此两式都具有足够的拟合精度。式中的 s, t, u, v 值见表 3。

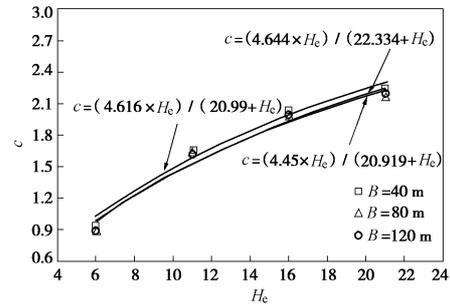


图 3 c 与 H_e 的关系

Fig. 3 Relationship between c and H_e

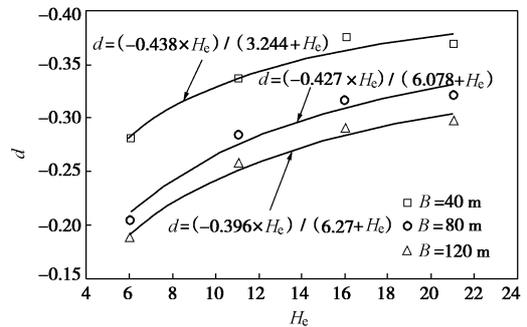


图 4 d 与 H_e 的关系

Fig. 4 Relationship between d and H_e

把式 (2)、(3) 代入式 (1)。每个 B 值下, 地表最大沉降与挖深的比值与系统刚度的关系可表达为

$$c = \frac{s \times H_e}{t + H_e}, \quad (2)$$

$$d = \frac{u \times H_e}{v + H_e}. \quad (3)$$

$$100 \frac{\delta_{vmax}}{H_e} = \left(\frac{s \times H_e}{t + H_e} \right) \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4} \right)^{\frac{u \times H_e}{v + H_e}}. \quad (4)$$

表 3 c, d 与 H_e 关系曲线拟合结果

Table 3 Fitting results of relationship between c, d and H_e

B /m	表达式系数				判定函数 R ²
	s	t	u	v	
40	4.616	20.990	-0.438	3.244	0.97
80	4.450	20.919	-0.427	6.078	0.97
120	4.644	22.334	-0.396	6.270	0.97

从表 3 亦可发现, v 随着 B 的增大而增大, s, t, u 随着 B 的增大变化幅度很小, s 接近于 4.57, t 接近于 21.414, u 接近于 -0.42。因此, 地表最大沉降与开挖深度的比值与系统刚度的关系又可近似表示为

$$100 \frac{\delta_{vmax}}{H_e} = \left(\frac{4.57 H_e}{21.414 + H_e} \right) \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4} \right)^{\frac{-0.42 H_e}{v + H_e}}. \quad (5)$$

图 5 为 v 与 B 的关系, 两者的关系可用下式拟合:

$$v = -14.541 \exp\left(\frac{B}{-26.987}\right) + 6.611 \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5), 则最大地表沉降可表达为

$$\delta_{vmax} = \frac{4.57H_c}{21.414 + H_c} \times \left(\frac{EI}{\gamma_w h^4}\right)^{\left[\frac{-0.42H_c}{-14.541 \exp\left(\frac{B}{-26.987}\right) + 6.611 + H_c}\right]} \times \frac{H_c}{100} \quad (7)$$

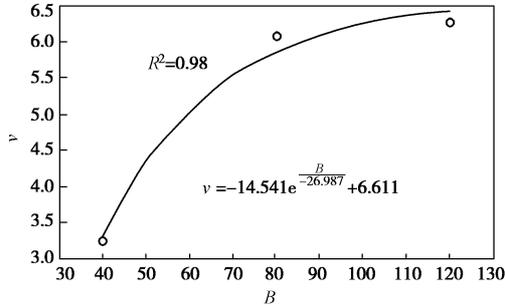


图 5 v 与 B 的关系

Fig. 5 Relationship between v and B

2.2 地表沉降预测曲线

图 6 是把 4 个基本分析模型在不同 B 值下的地表沉降计算结果无量纲化后绘制成的地表沉降预测曲线。借鉴 Hsieh^[7]把地表沉降预测曲线分成主影响区域和次影响区域的思想, 把绘制成的地表沉降预测曲线进行了划分。如图 6 (a) 所示, 当基坑开挖深度小于 7 m 时, 选用折线 ABCD 预测地表沉降, 主影响区域和次影响区域的范围均为 3 倍开挖深度, 最大沉降发生在距离墙后 0.8H_c 的位置处, 而紧靠墙体处沉降为最大沉降 0.5 倍。当基坑挖深大于 7 m 时, 选用折线 EFGH (见图 6 (b)) 预测地表沉降, 主影响区域范围为 2 倍的开挖深度, 次影响区域为主影响区域之后的 3 倍开挖深度, 最大沉降发生在距离墙后 0.5H_c 的位置处, 而紧靠墙体处的沉降为最大沉降 0.5 倍。

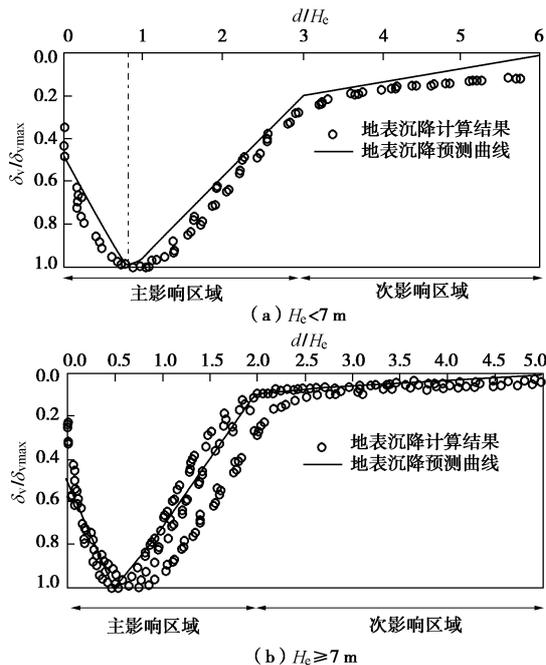


图 6 墙后地表沉降曲线

Fig. 6 Ground surface settlement profile behind walls

3 墙后地表沉降简化计算方法验证

为了验证式 (7) 和图 6 所示的地表沉降预测曲线是否适合于上海地区的板式支护体系基坑地表沉降的预测, 收集了上海地区 5 个板式支护体系基坑地表沉降的实测数据。图 7 中, (c) 和 (e) 可参考文献[2], 7 (d) 可参考文献[8]。图 7 中的对比可看出, 本文方法预测的地表沉降曲线基本上能与实测结果相吻合。

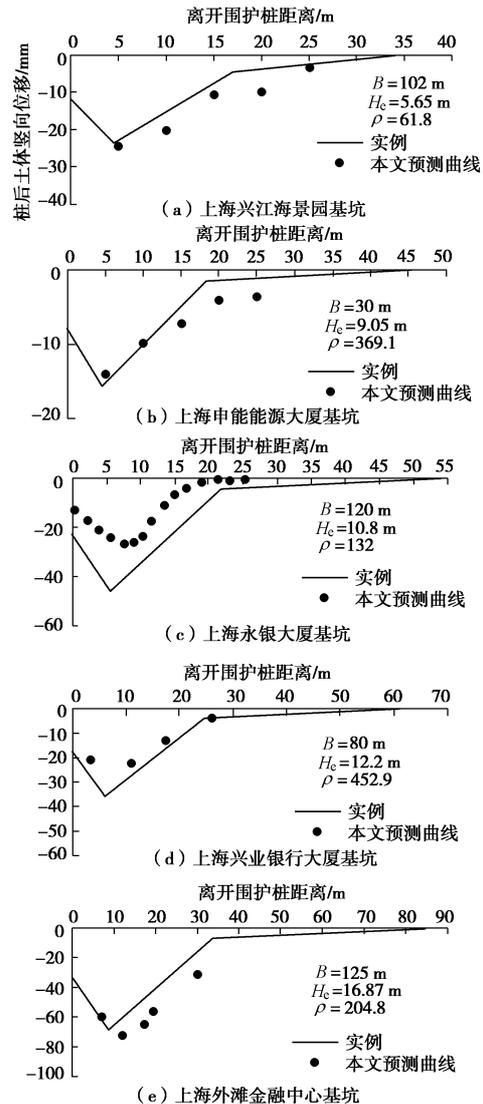


图 7 地表沉降预测值与实测值的对比

Fig. 7 Comparison between estimated ground surface settlements and observed results

4 板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化分析方法及工程应用实例

4.1 板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化方法

文献[2]指出, 基坑与其周边的建筑物是一个相互作用的系统, 简化方法不考虑这种相互作用, 即假定建筑物不存在的条件下, 预估自由地表的沉降, 并认为建筑物所在位置的自由地表沉降值即为该位置建筑

物的沉降值。由于建筑物与基坑共同作用,实际产生的地表沉降与自由地表沉降必然存在一定的差别。一般而言,建筑物具有一定刚度,其刚度的影响会使得实际地表沉降略小于自由地表下的沉降;另一方面,建筑物自重对基坑而言又是一种超载,其作用会导致实际沉降略大于自由地表的沉降。综合这两种因素的影响,考虑建筑物存在的情况下所产生的地表沉降可能与不考虑建筑物存在的情况下产生的沉降相差不大,因此,作为工程应用而言,简化方法的这种假设具有其合理性。本文提出的简化方法较适合于分析基坑开挖对浅基础建筑及地下管线等的影响,不适合分析对有一定埋深的隧道及桩基础建筑物的影响。

4.2 工程应用实例

采用本文给出的简化方法分析了上海兴业银行大厦基坑开挖对西侧交通银行大楼的影响,上海兴业银行大厦基坑的详细信息可参考文献[8]。其邻近的交通银行大楼为上海市优秀近代保护建筑,建于1934年,为七层钢筋混凝土框架结构,建筑高25.9 m,基础为梁板式筏板基础。该侧基坑挖深为14.2 m,宽度为80 m,地下连续墙厚度为1000 mm,深度为31.2 m,基坑系统刚度经计算为3086。根据式(7)可以计算出地表最大沉降为23.7 mm,然后再根据图6得到了如图8所示的地表沉降预测曲线。图8还给出了交通银行大楼沉降的实测结果,可以看出实测值与计算值吻合得较好,这也说明采用本文的简化方法来预估上海地区板式支护体系基坑开挖对环境的影响是合理的。

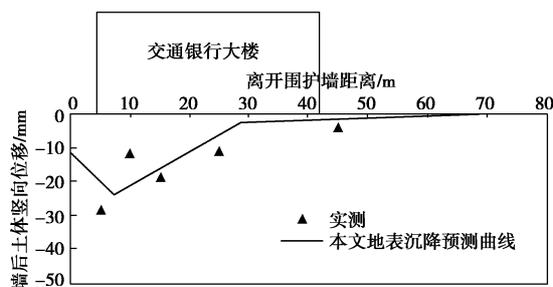


图8 预测值与实测值的对比

Fig. 8 Comparison between estimated results and observed data

5 结 语

通过对基于土体 HS-Small 模型的板式支护体系基坑开挖有限元计算结果的分析及拟合,推导了能够综合考虑基坑系统刚度、基坑开挖深度和基坑宽度的上海地区板式支护体系基坑地表最大沉降的简化计算公式,提出了地表沉降预测曲线,给出了上海地区板式支护体系基坑开挖对环境影响的简化分析方法。采

用本文给出的简化方法预估了上海兴业银行大厦基坑开挖对邻近浅基础建筑物的影响,并将计算结果与实测结果进行了对比。结果表明该简化方法能较好地预估基坑开挖对邻近浅基础建筑物的影响,从而为上海地区板式支护体系基坑工程设计提供了一种预估基坑开挖对周边环境影响的简化分析方法。

参考文献:

- [1] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 32 - 38. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 32 - 38. (in Chinese))
- [3] 王浩然. 上海软土地区深基坑变形与环境影响预测方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012. (WANG Hao-ran. Prediction of deformation and response of adjacent environment of deep excavations in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [4] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: Institute of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, 2007.
- [5] 徐中华, 王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258 - 264. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258 - 264. (in Chinese))
- [6] SCHWEIGER H F, VERMEER P A, WEHNERT M. On the design of deep excavations based on finite element analysis[J]. Geomechanics and Tunneling, 2009, 2: 333 - 344.
- [7] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004 - 1017.
- [8] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)